# 考虑晶粒度的 GH4169 高温合金微铣削残余应力仿真与实验研究

王敏婷[1,2],申利雄[1,2],梁栋[1,2],李哲[1,2],赵磊[1,2],李学通[1,2]

(1. 燕山大学机械工程学院,066004 秦皇岛;2. 河北省重型智能制造装备技术创新中心,066004 秦皇岛)

**摘　要:**微细铣削中,由于受加工余量限制,铣刀每齿进给量非常小甚至小于材料内部晶粒尺寸。当切削在晶粒间进行时会造成切削不连续,从而使铣削过程颤振急剧增大,引起加工表面质量下降,严重影响微型零件的疲劳寿命和使用性能。本研究基于 Voronoi 图建立多晶体几何模型,通过仿真与实验验证的方法对刀具刃口圆弧半径、切削深度和晶粒尺寸对已加工表面残余应力的影响规律进行详细研究,建立多元线性回归模型并进行显著性检验。对经热处理后具备不同晶粒尺寸的高温合金 GH4169 进行微铣削实验,通过 X 射线衍射法测量工件进给方向已加工表面的残余应力值,将实验值与预测值进行对比,从而验证残余应力预测模型的准确性。结果表明,其误差分布在 2.18% ~7.35%,不超过 10%,说明残余应力的预测模型准确性较高。

**关键词:**晶粒度;微细铣削;残余应力;预测模型

**中图分类号:**TG166　　**文献标志码:**A

# Research on residual stress in micro-milling of GH4169 superalloy considering grain size

WANG Minting[1,2],SHEN Lixiong[1,2],LIANG Dong[1,2],LI Zhe[1,2],ZHAO Lei[1,2],LI Xuetong[1,2]

(1. College of Mechanical Engineering,Yanshan University,066004 Qinhuangdao,China;
2. Heavy-duty Intelligent Manufacturing Equipment Innovation Center of Hebei Province,066004 Qinhuangdao,China)

**Abstract:** In micro-milling,due to the limitation of machining allowance,the feed per tooth of the milling cutter is very small or even smaller than the internal grain size of the material. When the cutting is carried out between the grains,it will cause discontinuity in cutting,which will sharply increase the chatter during the milling process,cause the quality of the processed surface to decrease,and seriously affect the fatigue life and performance of the micro-parts. Based on the Voronoi diagram,the paper establishes a polycrystalline geometric model. Through the method of simulation and experimental verification,the influence law of the cutting edge arc radius,cutting depth and grain size on the residual stress of the machined surface is studied in detail, and a multiple linear regression model is established. Perform a significance test. The

**收稿日期:**2021-05-31　　**修回日期:**2022-06-06
**基金项目:**河北省自然科学钢铁联合基金(No. E2015203343)
**通信作者:**王敏婷,副教授。E-mail:wmt@ ysu. edu. cn
**引用格式:**王敏婷,申利雄,梁栋,等. 考虑晶粒度的 GH4169 高温合金微铣削残余应力仿真与实验研究[J]. 应用力学学报,2022,39(4):766-774,790.
WANG Minting,SHEN Lixiong,LIANG Dong,et al. Research on residual stress in micro-milling of GH4169 superalloy considering grain size [J]. Chinese journal of applied mechanics,2022,39(4):766-774,790.

micro-milling experiment was carried out on the superalloy GH4169 with different grain sizes after heat treatment. The residual stress value of the machined surface in the feed direction of the workpiece was measured by X-ray diffraction method, and the experimental value was compared with the predicted value to verify the residual stress prediction model Accuracy. The results show that the error distribution is 2.18%-7.35%, not more than 10%, which can indicate that the prediction model of residual stress is more accurate.

**Key words**: grain size; micro-milling; residual stress; prediction model



在微细铣削中切削参数减小,与材料的晶粒尺寸相当,实际上的切削相当于在不同晶粒中进行,造成切削过程的不连续,工件应该被视为不均匀的、各向异性的。微型零件由于尺寸小、刚度低,加工过程中容易产生变形,从而导致其可靠性及使用性能降低[1-2]。微型零件的使用性能与工件的表面质量息息相关,在表面质量的各个指标中,已加工表面残余应力对零件的静力强度、抗疲劳强度、使用寿命等有着重大影响[3]。在对微细铣削过程研究中,考虑工件材料的晶粒度,对切削力的控制和切削完成后零件的表面质量控制都有着重要的指导意义,建立多晶体材料的切削模型可以更准确地预测最小切屑厚度、切削力、残余应力等,对实际加工过程具有指导作用。

传统切削中,切削参数相对较大,可以忽略晶体结构中的点缺陷、位错缺陷和裂纹等微观缺陷,工件可以被视为均匀的、各向同性的,多晶体材料由于塑性变形导致颤振急剧增大而影响加工过程中切削力和切削温度,从而对残余应力的影响不可以忽略。通过研究刀具刃口圆弧半径与材料晶粒尺寸对切削力的影响,发现材料粒度越小,切削力越大,比切削能越高。这是由于随着材料的平均粒径减小,晶界的影响增强,剪切力和犁切力也随之变得更大[4]。Liu 等[5]对不同晶粒尺寸的 Al 5000 铝合金微铣削,通过细化材料微观结构可以显著改善工腔的表面完整性。残余应力是评价切削完成后零件表面质量的重要指标,朱黛茹[6]在微铣削硬铝合金 LY12 实验基础上,建立了基于响应曲面法和回归分析方法的微铣削残余应力预测模型,模型预测值与实验测量值吻合,该模型回归显著,拟合度达到 97.5%,证实模型的有效性。周军[7]通过微车削残余应力实验,分析不同切削深度对工件圆周方向和轴向方向上残余应力的影响规律,发现工件表面两个方向上均为残余拉应力,并且拉应力的值随着切削深度的增大而增大。路彦君[8]以镍基高温合金 Incone1718 为研究对象,在 ABAQUS 里建立微铣削三维仿真模型,研究了每齿进给量对进给方向和垂直于进给方向残余应力的影响规律并通过实验进行验证。

材料的本构模型反映的是应力与温度、应变、应变速率等材料状态变量的映射关系。在传统切削研究中,常用的本构模型无法解释在微铣削小尺度下的尺寸效应和最小切削厚度等现象。Liu 等[9-10]基于泰勒位错机制的应变梯度理论,修正了正交微切削铝过程的本构模型,对比有无应变梯度对切削力以及切削温度的影响,发现修正的本构模型可以很好地表示尺度效应。Wu 等[11]将应变梯度塑性理论应用到 45 钢微切削第 I 变形区模型,研究主剪切变形区的有效流动应力、应变分布及变化规律。

残余应力的产生是一个非常复杂的过程,与切削加工过程中的热力耦合密切相关,不同切削参数、刀具、加工方式都会对残余应力产生较大的影响。上述学者在对残余应力研究中没有将工件的晶粒尺寸考虑在内。微细铣削中,刀具刃口圆弧半径、切削用量以及工件材料的晶粒尺寸都处于微米级别,实际上的切削相当于在不同晶粒中进行,相当于宏观上的不连续切削,会对切削过程中塑性变形以及切削热产生影响,进而对已加工表面残余应力的分布和大小产生影响。

本研究将通过多组正交仿真分析对已加工表面残余应力进行研究,建立多元线性回归模型并进行显著性检验,通过实验对预测模型准确性进行验证。

## 1 仿真模型建立及验证

### 1.1 微铣削过程模型简化

微铣削加工是一个断续切削过程,加工过程中切削深度时刻随着刀齿的运动而变化。实际三维铣削仿真由于切削过程、接触条件的设置复杂,其仿真速度慢,计算结果不容易收敛,因此在保证仿真结果准确的前提下,可以通过合理的假设对仿真模型进行简化。

基于平面应变状态假设条件:①切削宽度大于等于 5 倍切削深度;②塑性变形仅发生在与切削刃

垂直的平面。当满足以上两个假设条件时,可以根据弹塑性力学理论将铣削加工简化为平面应变问题,从而可以利用二维正交切削模型进行仿真分析。

由于切削深度非常小,可以忽略铣刀切削刃的螺旋角,因此可以将图 1(a)所示的实际微铣削过程简化为图 1(b)所示的平面模型,即将三维微铣削过程中的恒定切削深度转变为平面模型中的工件厚度。加工变形区的尺寸(微米级和亚微米级)远小于微铣刀直径(几百微米),根据图 1(c)所示的铣削过程工件变形区局部放大图,其类似于图 1(d)的正交切削过程,此时切削深度相当于微铣削过程中每齿进给量[12]。

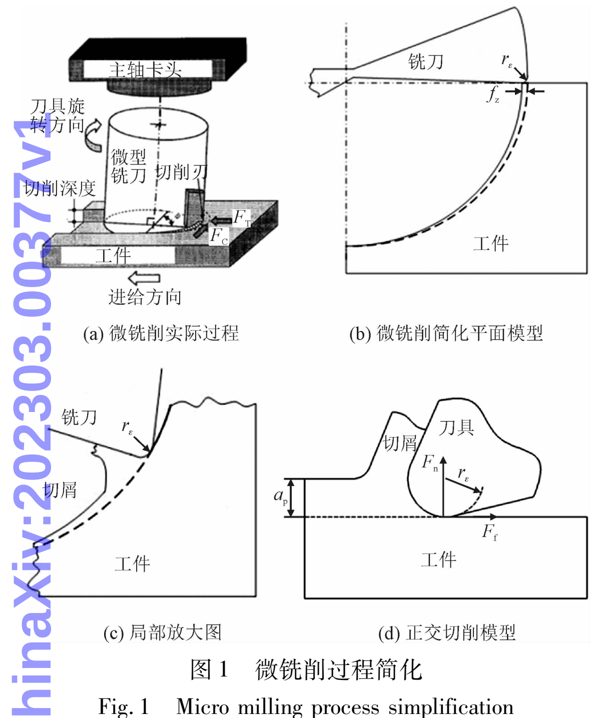



图 1　微铣削过程简化

Fig. 1　Micro milling process simplification

图 1 中:$r_\varepsilon$ 为刀具刃口圆弧半径;$f_z$ 为每齿进给量;$F_n$ 为正应力;$F_f$ 为摩擦力。

## 1.2　多晶体几何模型建立

基于 Voronoi 图的结构原理[13],通过 MATLAB 生成随机的晶粒结构,并将其导入有限元软件 ABAQUS 生成工件几何模型。图 2 为包含 18 个晶粒的多晶体几何模型,其平均晶粒尺寸为 33.3 μm,其完整的程序流程图如图 3 所示。

## 1.3　微铣削物理模型

### 1.3.1　本构模型

材料的本构模型描述的是应力与温度、应变、应变速率等材料状态变量的变化情况,可以反映变形过程中材料本质的变化,对有限元仿真效果及成败起着决定性的作用。

将泰勒位错理论和应变梯度理论引入,在 JC 本构模型的基础上进行修正,推导如下。

泰勒位错理论描述剪切流动应力 $\tau$ 与位错密度 $\rho$ 的关系为

$$\tau = \alpha bG\sqrt{\rho} = \alpha bG\sqrt{\rho_s} \qquad (1)$$

$$\sigma = k\tau \qquad (2)$$

统计存储位错 $\rho_s$ 与材料单轴拉伸参考流动应力 $\sigma_{ref}$ 的关系为

$$\sigma_{ref} = k\alpha bG\sqrt{\rho_s} = \sigma_{JC} \qquad (3)$$

微切削中由于尺寸效应的影响,材料的剪切流动应力由统计存储位错 $\rho_s$ 和几何必需位错 $\rho_G$ 共同决定,于是可以将式(1)变换为式(4),即

$$\tau = \alpha bG\sqrt{\rho} = \alpha bG\sqrt{\rho_s + \rho_G} \qquad (4)$$

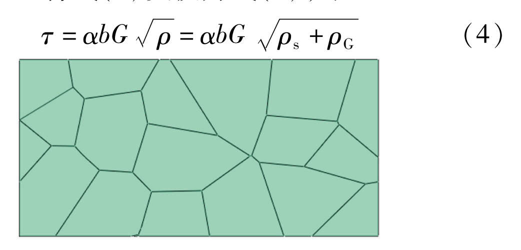


图 2　多晶体几何模型

Fig. 2　Polycrystalline geometric model

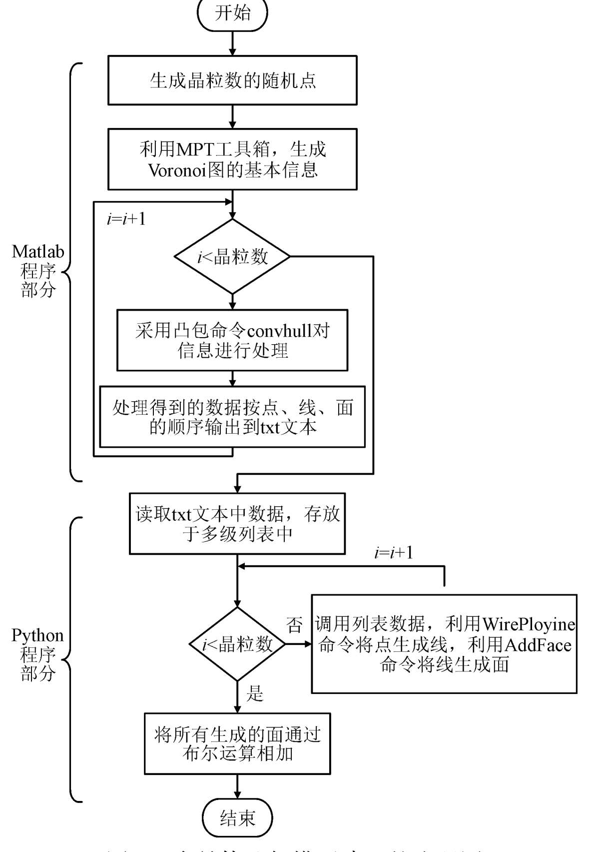



图 3　多晶体几何模型建立的流程图

Fig. 3　Flow chart of the establishment of a polycrystalline geometric model

几何必需位错可由应变梯度 $\eta$ 表示，即

$$\rho_G = \frac{2\eta}{b} \tag{5}$$

联立可以得到考虑应变梯度的流动应力，即

$$\sigma = \sigma_{JC}\sqrt{1 + 2\left(\frac{k\alpha G}{\sigma_{JC}}\right)^2 b\eta} \tag{6}$$

Li 等[14]研究得出当晶体发生塑性变形时，其应变 $\varepsilon$、统计存储位错 $\rho_s$ 和晶粒尺寸 $d$ 之间的近似关系为

$$\rho_s = \frac{\varepsilon}{kbd} \tag{7}$$

联立以上各式可以得到适用于多晶体材料切削的本构方程，即

$$\sigma = \sigma_{JC}\sqrt{1 + 2\left(\frac{\sigma_{JC} d}{\alpha b G \varepsilon}\right)^2 b\eta} \tag{8}$$

式中：$\sigma_{JC}$ 为 JC 模型下的等效流动应力；$\alpha$ 为实验常数，且 $\alpha = 0.5$；$b$ 为 Burgers 矢量；$G$ 为剪切模量，$G = 86.003$ GPa；$\eta$ 为应变梯度，且 $\eta = 0.38$[15]。

式(8)为在 JC 模型的基础上，基于细观力学应变梯度理论和位错理论建立的适用于多晶体材料微切削过程中材料本构模型，其反映了应力与应变、应变率、温度的关系，并且描述了微切削过程中尺寸效应等特有现象。根据 VUMAT 子程序二次开发计算步骤，实施的总体流程图如图 4 所示。



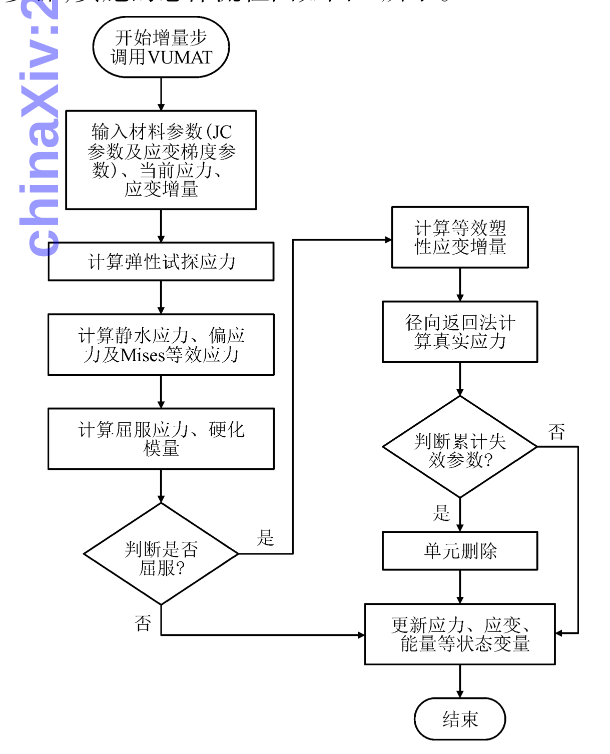



图 4　微铣削本构方程子程序开发流程图

Fig. 4　Flow chart of development of micro-milling constitutive equation subroutine

### 1.3.2　摩擦模型

金属切削过程中，在第Ⅱ变形区和第Ⅲ变形区都存在摩擦接触的关系，摩擦的作用会导致刀具强度和寿命降低、对切削过程中切削力和切削温度产生较大的影响，从而对工件的表面加工质量和加工精度产生严重的影响。

在金属切削有限元仿真软件 ABAQUS 里通常使用的摩擦模型为修正的库伦摩擦模型，该模型可以很好的体现黏结区和滑移区刀具和工件的摩擦接触情况，其数学表达式为

$$\tau_m = \begin{cases} \mu\sigma_n, \tau_m < \tau_{max}（滑动区） \\ \tau_{max}, \tau_m \geqslant \tau_{max}（黏结区） \end{cases} \tag{9}$$

式中：$\tau_m$ 摩擦应力；$\sigma_n$ 为正应力；$\tau_{max}$ 为工件材料的屈服应力；$\mu$ 为摩擦系数。

### 1.3.3　切屑分离准则

金属切削仿真模拟分析中切屑和工件的分离准则主要包括几何分离和物理分离。物理分离准则中的 JC 断裂准则可以同时反映出被加工材料的物理性质和力学性质，使有限元仿真模拟更接近于真实情况，其表达式为

$$\omega = \sum\left(\frac{\Delta\bar{\varepsilon}}{\bar{\varepsilon}_f}\right) \tag{10}$$

式中：$\Delta\bar{\varepsilon}$ 为等效塑性应变增量；$\bar{\varepsilon}_f$ 为等效破坏应变。

$\bar{\varepsilon}_f$ 的表达式如式(11)所示，失效参数如表 2 所示。

$$\bar{\varepsilon}_f = \left[d_1 + d_2\exp\left(d_3\frac{p}{q}\right)\right]\left[1 + d_4\ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0}\right)\right]\left[1 + d_5\left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right)\right] \tag{11}$$

式中：$p$ 为静水压应力；$q$ 为偏应力；$d_1 \sim d_5$ 为失效参数，如表 1 所示。

**表 1　GH4169 合金的失效参数[16]**

Tab. 1　Failure parameters of GH4169 alloy[16]

| 失效参数 | $d_1$ | $d_2$ | $d_3$ | $d_4$ | $d_5$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 数值 | 0.239 | 0.456 | −0.3 | 0.07 | 2.5 |

### 1.3.4　热传导模型

由于塑性变形和刀-屑摩擦会产生大量切削热，但是加工时间非常短，通常只考虑工件和刀具之间的热传导，而忽略工件与周围介质的热对流及工件与刀具表面的热辐射影响。二维切削仿真中热传导方程为

$$\lambda\left[\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2}\right] + \dot{q} = \rho_c C_p\left[u\frac{\partial T}{\partial X} + v\frac{\partial T}{\partial Y}\right] \tag{12}$$

式中：$\lambda$ 为热导率；$C_p$ 为比热容；$u$、$v$ 为动态热源在

$X$、$Y$ 方向上分支;$\dot{q}$ 为单位体积内总热生产率;$\rho_c$ 为工件的密度。

### 1.3.5 边界条件

在进行微铣削残余应力仿真时,将工件底部和左侧面完全固定,给刀具参考点施加沿 $x$ 负方向初始速度,其大小为 125.6 m/min。同时为了更加契合实际铣削过程,需要对工件和刀具设置温度边界条件,将其所有节点的初始温度定义为室温,取 25 ℃。

## 1.4 仿真模型验证

为了验证所建立的不同晶粒度的多晶体仿真模型是否准确,将基于 Voronoi 图建立的多晶体几何模型进行切削仿真,将其仿真得到的切削力与微铣削实验中测得真实的切削力进行比较,得到其相对误差。本次实验采用汉川机床公司生产的三坐标轴立式数控铣床,型号为 XK714D。加工的材料为经过热处理后平均晶粒尺寸为 20 μm 的镍基高温合金 GH4169 板材,利用 Kistler 测力仪采集 4 组微铣槽切削力。微铣槽实验参数如表 2 所示。刀具采用的株洲硬质合金厂生产的 4 刃平底硬质合金立铣刀,型号为 4W-4E-D4.0s,法前角 $\gamma_n = 10°$,后角 $\alpha_n = 8°$,螺旋角 $\beta_n = 45°$,涂层材料为立方氮化硼,不采用冷却液。



**表 2 仿真模型验证微铣槽实验参数**

Tab. 2 Simulation model to verify the experimental parameters of micro-milling slots

| 实验编号 | 主轴转速/rpm | 每齿进给量/μm | 切削深度/μm |
|---|---|---|---|
| 1 | 4 000 | 9 | 10 |
| 2 | 5 000 | 7 | 10 |
| 3 | 6 000 | 5 | 10 |
| 4 | 7 000 | 3 | 10 |

仿真过程中切削深度是保持在名义上每齿进给量不变的,仿真和实验得到的 $X$ 和 $Y$ 切削力代表含义不同,不能直接形成对比,因此本研究对 $X$ 和 $Y$ 方向的合力进行验证。其切削力对比及误差如表 3 所示。

由表 3 可知,基于修正的 JC 本构模型和常规 JC 本构模型的仿真与实验切削力相对误差最小的是第 1 组,其值分别为 6.32% 和 26.07%,误差最大是第 4 组为 16.18% 和 38.58%,平均误差分别为 10.92% 和 31.88%。基于修正的 JC 本构模型的切削力误差明显小于常规 JC 本构模型,且随着每齿进给量的减小,基于常规的 JC 本构模型的切削力误差呈现增大趋势,这主要是由于微切削中尺寸效应导致的。而基于修正的 JC 本构模型的切削力误差一直很小,可以很好地解释尺寸效应现象,从而验证本研究所建立仿真模型的准确性。

**表 3 仿真模型验证误差**

Tab. 3 Simulation model verification errors

| 编号 | 实验值/N | 修正模型仿真值/N | 误差/% | JC 模型仿真/N | 误差/% |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 21.98 | 23.37 | 6.32 | 16.25 | 26.07 |
| 2 | 27.82 | 31.38 | 12.79 | 36.10 | 29.76 |
| 3 | 17.44 | 18.91 | 8.41 | 23.22 | 33.14 |
| 4 | 23.05 | 26.78 | 16.18 | 31.94 | 38.58 |

# 2 残余应力仿真过程

残余应力的有限元仿真过程一般分为 4 个阶段:切削加工阶段、退刀阶段、约束转换以及冷却阶段。

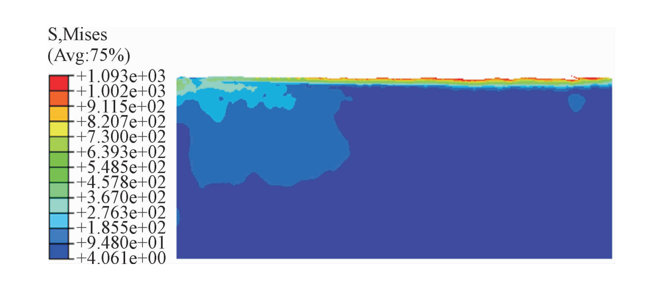



图 5 切削加工阶段完成后 Mises 应力云图

Fig. 5 Mises stress cloud after completion of the cutting process

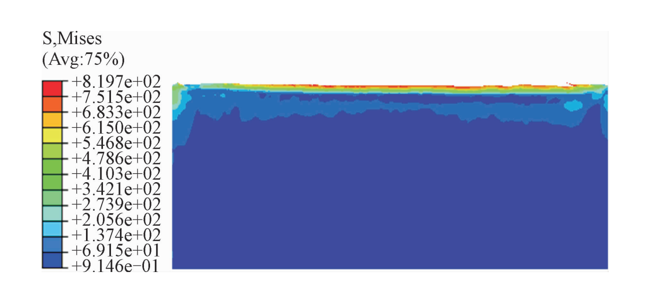



图 6 退刀和转化约束后 Mises 应力云图

Fig. 6 Mises stress cloud after tool withdrawal and transformation constraints

为了获取已加工表面残余应力值,在水平方向上等间隔取 10 个节点,然后在 ABAQUS 后处理中提

取其对应点的数值,将所提取出数值取平均值得到已加工表面的残余应力值。

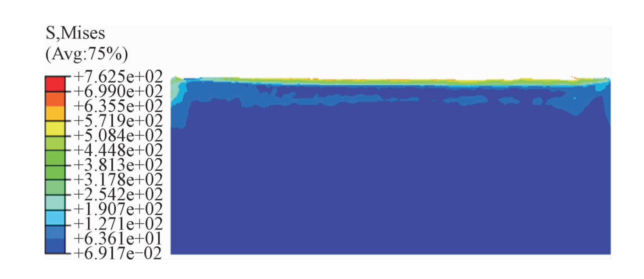



图 7　自然冷却后 Mises 应力云图

Fig. 7　Mises stress cloud after natural cooling

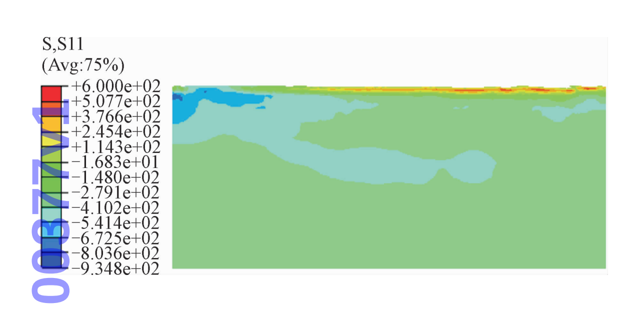



图 8　最终残余应力云图

Fig. 8　Final residual stress cloud

# 3　残余应力预测模型

## 3.1　残余应力正交仿真

本研究主要研究刀具刃口圆弧半径、切削深度和晶粒尺寸对微铣削高温合金 GH4169 已加工表面残余应力的影响规律。设计三因素四水平正交仿真实验，其因素水平表如表 4 所示。根据因素水平表，选用标准正交实验表 L16（45）设计正交实验仿真方案来研究各因素对微细铣削高温合金 GH4169 表面残余应力的影响，正交表及其仿真结果如表 5 所示。

表 4　正交仿真因素水平表

Tab. 4　Level table of orthogonal simulation factors

| 水平 | A 晶粒尺寸/μm | B 刃口半径/μm | C 切削深度/μm |
|---|---|---|---|
| 1 | 10 | 5 | 4 |
| 2 | 20 | 10 | 9 |
| 3 | 33.3 | 20 | 15 |
| 4 | 40 | 30 | 25 |

表 5　正交仿真方案及结果

Tab. 5　Orthogonal simulation scheme and results

| 编号 | A | B | C | 水平组合 | σ/MPa |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 | 1 | A1B1C1 | 258.74 |
| 2 | 1 | 2 | 2 | A1B2C2 | 214.32 |
| 3 | 1 | 3 | 3 | A1B3C3 | 275.83 |
| 4 | 1 | 4 | 4 | A1B4C4 | 231.98 |
| 5 | 2 | 1 | 2 | A2B1C2 | 190.18 |
| 6 | 2 | 2 | 1 | A2B2C1 | 248.59 |
| 7 | 2 | 3 | 4 | A2B3C4 | 200.37 |
| 8 | 2 | 4 | 3 | A2B4C3 | 180.63 |
| 9 | 3 | 1 | 3 | A3B1C3 | 189.82 |
| 10 | 3 | 2 | 4 | A3B2C4 | 170.13 |
| 11 | 3 | 3 | 1 | A3B3C1 | 198.25 |
| 12 | 3 | 4 | 2 | A3B4C2 | 190.49 |
| 13 | 4 | 1 | 4 | A4B1C4 | 170.71 |
| 14 | 4 | 2 | 3 | A4B2C3 | 194.33 |
| 15 | 4 | 3 | 2 | A4B3C2 | 195.45 |
| 16 | 4 | 4 | 1 | A4B4C1 | 223.69 |

## 3.2　残余应力预测模型建立

假设已加工表面残余应力与晶粒尺寸、切削深度以及刀具刃口圆弧半径之间存在复杂的指数关系,通过统计学的方法建立残余应力的正交回归的预测模型,即

$$\sigma_r = C d^{b_1} a_p^{b_2} r_\varepsilon^{b_3} \tag{13}$$

式中:$\sigma_r$为残余应力;$C$ 为常数,数值大小由加工材料和切削条件决定;$b_1$,$b_2$,$b_3$为待定系数。

通过变化得到其相应的线性回归方程为

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 \tag{14}$$

在回归方程中加上一项实验误差 $\varepsilon$,则 16 组仿真结果建立的多元线性回归方程可以用矩阵形式表示为

$$\boldsymbol{Y} = \boldsymbol{X\beta} + \boldsymbol{e},$$

$$\boldsymbol{Y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_{16} \end{pmatrix}, \boldsymbol{X} = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & x_{13} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & x_{23} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{161} & x_{162} & x_{163} \end{pmatrix}, \boldsymbol{e} = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_{16} \end{pmatrix},$$

$$\boldsymbol{\beta} = \begin{pmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{pmatrix}$$

参数 $\boldsymbol{\beta}$ 可通过最小二乘法进行估计,则回归方程的估计量为

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 \tag{15}$$

式中 $b_0, b_1, b_2, b_3$ 分别对应参数 $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ 的最小二乘估计,则

$$\boldsymbol{b} = (\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X}) - 1\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Y} \tag{16}$$

将向量 $\boldsymbol{X}$ 和 $\boldsymbol{Y}$ 代入式(18),可得

$$\boldsymbol{b} = \begin{pmatrix} 2.172\,6 \\ -0.055\,7 \\ 0.105\,5 \\ 0.112\,3 \end{pmatrix}$$

则根据正交仿真结果所得到的数据,得到残余应力的预测模型,即

$$\sigma_{残} = 148.798\,9 d^{-0.055\,7} a_{\mathrm{p}}^{0.105\,5} r_{\varepsilon}^{0.112\,3} \tag{17}$$

### 3.3 预测模型显著性检验

在建立残余应力预测模型之前,随机变量 $y$ 与 $x_1$、$x_2$、$x_3$、$x_4$ 之间的关系不确定,只能通过假设的方法来进行判定。因此当求出预测模型之后,需要对模型的显著性进行检验以此来判断预测模型拟合的好坏程度。

为了进行统计检验,将回归模型的总偏差平方和 $S_{\mathrm{T}}$ 表示为

$$S_{\mathrm{T}} = S_{\mathrm{A}} + S_{\mathrm{E}} \tag{18}$$

式中:$S_{\mathrm{A}}$ 为回归偏差平方和;$S_{\mathrm{E}}$ 为剩余平方和,可以表示为

$$S_{\mathrm{T}} = \sum_i (y_i - \bar{y})^2 = \sum y_i^2 - \frac{1}{n}(\sum_i y_i)^2,$$

$$S_{\mathrm{E}} = \sum (y_i - \hat{y})^2,$$

$$S_{\mathrm{A}} = \sum (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2$$

采用 $F$ 检验。假设 $H_0: \beta_1 = 0, \beta_2 = 0, \beta_3 = 0$,可采用式(19)所示的统计量,即

$$F = \frac{S_{\mathrm{A}}/s}{S_{\mathrm{E}}/(n-s-1)} \sim F(S_{\mathrm{T}}, n-s-1) \tag{19}$$

本研究实验组数 $n = 16$,变量个数 $s = 3$,分别计算式(18)和式(19),显著因子取 0.01,将计算结果列于表 6。查 $F$ 分布表得 $F_{0.01}(3,12) = 5.95 < F = 25.43$,拒绝原假设,因此本研究所建立的残余应力预测模型是高度显著的。

**表 6 残余应力方差分析表**

Tab.6 Variance analysis table of residual stress

| 方差来源 | 平方和 | 自由度 | 方差 | $F$ 值 |
|---|---|---|---|---|
| $S_{\mathrm{A}}$ | 17.54 | 3 | 5.85 | 25.43 |
| $S_{\mathrm{E}}$ | 2.76 | 12 | 0.23 | |
| $S_{\mathrm{T}}$ | 20.30 | 15 | – | – |

## 4 预测模型实验验证

当合金成分一定时,热处理工艺就成为改变合金组织的重要手段。不同的热处理方案,可以控制合金的晶粒尺寸,析出强化相的数量、形貌,进而可以根据实际需求,使合金具有不同的力学性能。GH4169 合金最常用的热处理工艺需要经历固溶处理和双级时效处理两个阶段。其中固溶处理有两个目的,其一是溶解材料中基本组成相和杂质物,从而形成一种均匀的过饱和固溶体,其二是为了改变晶粒尺寸。本研究确定其热处理方案如表 7 所示,其最终测得平均晶粒尺寸分别为 10 μm 和 40 μm。

**表 7 热处理工艺**

Tab.7 Heat treatment process

| | 固溶处理 | 时效处理 |
|---|---|---|
| 1 | 985 ℃ ×1 h,空冷 | 720 ℃ ×1 h 炉冷 +620 ℃ ×8 h 空冷 |
| 2 | 1 035 ℃ ×1 h,空冷 | 720 ℃ ×1 h 炉冷 +620 ℃ ×8 h 空冷 |

### 4.1 实验装备

如图 9 所示,实验所用机床为日本 NanoWare 公司生产的精密数控微铣床,型号为 MTS5R,工件的安装及预加工如图 10(a)~10(b)所示。检测设备是日本 Rigaku International Corpratio 公司生产的 X 射线衍射仪,其型号为 D/MAX2500HB +/PC,其中 XRD 实验的参数设置:靶材为 Cu、准直管直径为 0.5、镜面为 311、衍射角为 20°~90°、弹性模量为 206 GPa 和泊松比为 0.3。

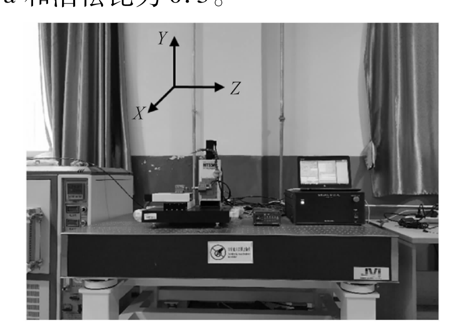



图 9 MTS5R 精密数控微铣床

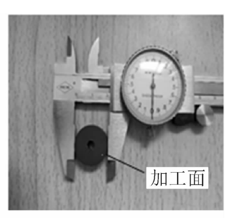
Fig.9 MTS5R precision CNC micro-milling machine

实验工件材料为镍基高温合金 GH4169,工件形状为 $\Phi$21 mm ×7 mm 圆饼状,中间为 $\Phi$5 mm 的通孔,如图 12(c)所示。刀具采用定制的日本 NS Tool 公司生产的 4 刃平底硬质合金立铣刀,型号为 MXH225,刃口圆弧半径分别为 10 μm 和 20 μm,其

他主要参数：涂层为 TiAlN、刃径为 1 mm、刃长为 5 mm、刀长为 45 mm、锥柄角为 9°和螺旋角为 25°。


(a) 安装


(b) 预加工



(c) 热处理完工件

图 10　工件安装及预加工

Fig. 10　Workpiece installation and pre-processing

## 4.2　实验方案

实验切削速度与仿真中一样，均为 125.6 m/min，其晶粒尺寸、刃口半径和每齿进给量（由 1.1 节切削仿真模型简化中切削深度相当于微铣削过程中单齿进给量）参数的选择在正交仿真选取的各因素的范围内，随机选取 4 组参数进行实验验证，如表 8 所示。

表 8　残余应力模型验证实验表

Tab. 8　Residual stress model verification experiment table

| 水平 | 晶粒尺寸/μm | 刃口半径/μm | 每齿进给量/μm |
|---|---|---|---|
| 1 | 10 | 10 | 5 |
| 2 | 10 | 10 | 10 |
| 3 | 40 | 20 | 15 |
| 4 | 40 | 20 | 20 |

## 4.3　实验结果

将样品进行全谱扫描，确定合适的衍射峰，然后按照提前设置好的 4 个偏转角度慢速扫描选择衍射峰，测出图谱后采用 JADE 软件中的定峰方法得到 $2\theta$ 值，在 ORIGIN 里画出并拟合得到关系曲线，得到曲线的斜率，进而可以求出残余应力值。

表 8 所示切削参数加工后的表面经过 XRD 扫描后图谱如图 11 所示，其测量结果中，出现衍射峰的角度的分布情况如表 9 所示。

(a) 第1组

(b) 第2组

(c) 第3组

(d) 第4组

图 11　实验对照组 XRD 衍射图谱

Fig. 11　XRD diffraction pattern of the experimental control group

表 9　产生衍射峰的 $2\theta$ 值

Tab. 9　$2\theta$ value of diffraction peak

| 实验号 | 产生衍射峰的位置 $2\theta$ | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 47.28 | 54.60 | 75.34 | 86.42 |
| 2 | 43.52 | 50.68 | 73.90 | 87.96 |
| 3 | 43.66 | 50.54 | 74.44 | 87.82 |
| 4 | 46.24 | 56.59 | 76.26 | 87.58 |

(a) 第1组

(b) 第2组

(c) 第3组

(d) 第4组

图 12　实验对照组 $2\theta$-$\sin^2\psi$ 拟合曲线

Fig. 12　Experimental control group fitting curve

表 10　残余应力模型误差

Tab. 10　Residual stress model errors

| 实验号 | 预测值/MPa | 实验值/MPa | 误差/% |
|---|---|---|---|
| 1 | 200.835 7 | 210.094 2 | 4.61 |
| 2 | 216.121 7 | 231.970 7 | 7.35 |
| 3 | 243.815 9 | 238.500 7 | 2.18 |
| 4 | 251.328 1 | 262.048 1 | 4.29 |

表 10 为通过正交仿真建立的回归模型与 XRD 实验测得的残余应力值的误差，其误差分布在 2.18% ~7.35%，不超过 10%，因此可以说明残余应力的预测模型准确性较高，对于后期实际加工过程中残余应力的预测有一定的指导作用。

## 5　结　论

1）根据平面应变状态假设条件，将其简化为二维正交切削模型，基于 Voronoi 图的结构原理建立多晶体 GH4169 二维几何模型。将同条件 JC 模型、修正后 JC 模型得到的仿真切削力与实验测得值对比并计算相对误差，误差最小的分别为 26.07% 和 6.32%，误差最大是 38.58% 和 16.18%，平均误差分别为 31.88% 和 10.92%。基于修正的 JC 模型的切削力误差小于 JC 模型且一直很小，可以很好地解释尺寸效应，从而验证了本研究所建立的仿真模型的准确性。

2）运用多元线性回归理论对残余应力与晶粒尺寸、切削深度、刀具刃口圆弧半径的数学关系进行了预测，并对模型的显著性进行检验，结果表明模型是高度显著的。

3）对高温合金 GH4169 进行不同热处理工艺，得到不同晶粒尺寸，设置与仿真参数一致的微铣削实验，运用 XRD 测量表面残余应力，将实验测量的残余应力与模型预测的进行误差分析，其误差分布在 2.18% ~7.35%，不超过 10%，因此可以说明残余应力的预测模型准确性较高，对于后期实际加工过程中残余应力的预测有一定的指导作用。

**参考文献：**


[1] COPPEL R, ABELLAN J, SILLER H, et al. Adaptive control optimization in micro-milling of hardened steels—evaluation of optimization approaches[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2016, 84(9): 2219-2238.

[2] LEO S, JERALD J, KUMANAN S, et al. A review on current research aspects in tool-based micromachining processes[J]. Materials and manufacturing processes, 2014, 29(11/12): 1291-1337.

[3] ISOMURA K, TANAKA S, TOGO S, et al. Development of microcromachine gas turbine for portable power generation[J]. Bulletin of the JSME, 2005, 47(3): 459-464.

[4] WU X, LI L, HE N, et al. Influence of the cutting edge radius and the material grain size on the cutting force in micro cutting[J]. Precision engineering, 2016, 45: 359-364.

[5] LIU X, DEVOR R E, KAPOOR S G. The mechanics of machining at the microscale: assessment of the current state of the science [J]. Journal of manufacturing science and engineering, 2004, 126: 666-678.

[6] 朱黛茹. 微细铣削表面粗糙度和残余应力的研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学, 2007.

[7] 周军. 铝合金 7050-T7451 微切削加工机理及表面完整性研究[D]. 济南：山东大学, 2010.

[8] 路彦君. 镍基高温合金 Inconel718 微铣削残余应力与加工硬化研究[D]. 大连：大连理工大学, 2016.

[9] LIU K. Processes modeling of micro-cutting including strain gradient effects[D]. Georgia: Georgia Institute of Technology, 2005.

[10] LIU K, MELKOTE S N. Finite element analysis of the influence of tool edge radius on size effect in orthogonal micro-cutting process [J]. International journal of mechanical mciences, 2007, 49(S1): 650-660.


（下转第 790 页）